

---

---

---

---

# МАШИНОСТРОЕНИЕ MECHANICAL ENGINEERING

---

---

---

---

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-271-279>

УДК 621.9

## Исследование влияния аэродинамического звукового упрочнения на износ металлорежущих твердосплавных пластин с покрытиями

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. В. К. Шелег<sup>1)</sup>,  
канд. техн. наук, доц. А. Н. Жигалов<sup>2)</sup>, асп. Д. Д. Богдан<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>Барановичский государственный университет (Барановичи, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020  
Belarusian National Technical University, 2020

**Реферат.** Для повышения стойкости металлорежущих твердосплавных пластин, работающих при процессах прерывистого резания в тяжелых технологических условиях с ударной нагрузкой, разработан метод аэродинамического звукового упрочнения, используя который с небольшой добавленной стоимостью возможно увеличить ресурс твердосплавного инструмента до 3,7 раза. Износ пластин, упрочненных аэродинамическим звуковым методом, после 100 мин резания меньше своих неупрочненных аналогов в 1,12–1,7 раза. Покрытие на металлорежущих твердосплавных пластинах не носит превалирующего значения при работе инструмента с ударными нагрузками. В последнем случае наибольшее влияние на повышение стойкости оказывает вязкость внутренней структуры пластины. Для металлорежущих твердосплавных пластин в процессе прерывистого резания со значительными ударными нагрузками метод аэродинамического звукового упрочнения более эффективен, чем метод нанесения покрытий, причем не только по стойкостным показателям работы инструмента, но и по себестоимости самой доработки. Получены эмпирические зависимости износа по задней поверхности твердосплавных пластин, упрочненных аэродинамическим звуковым методом, и пластин с покрытиями PVD в виде аппроксимации полиномами 5-й и 2-й степеней, которыми удобно пользоваться в производственных условиях. Выявлено, что чем больше у твердосплавных пластин предел прочности при изгибе, тем меньше влияние метода аэродинамического звукового упрочнения на повышение износостойкости. Так, с учетом того, что для основы ВК8 предел прочности при изгибе составляет 1666 МПа, а для Т5К10 – 1421 МПа, снижение износа после упрочнения аэродинамическим звуковым методом для пластин ВП3115 с основой ВК составляет 11,5 %, в то время как для ВП3225 с основой ТК – 27,1 %.

**Ключевые слова:** аэродинамическое звуковое упрочнение, твердые сплавы, покрытия, износостойкость

**Для цитирования:** Шелег, В. К. Исследование влияния аэродинамического звукового упрочнения на износ металлорежущих твердосплавных пластин с покрытиями / В. К. Шелег, А. Н. Жигалов, Д. Д. Богдан // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 4. С. 271–279. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-271-279>

## Study on Effect of Aerodynamic Sound Hardening for Wear of Coated Carbide Metal Plates

V. K. Sheleg<sup>1)</sup>, A. N. Jigalov<sup>2)</sup>, D. D. Bogdan<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2)</sup>Baranovich State University (Baranovich, Republic of Belarus)

**Abstract.** To increase the durability of metal-cutting carbide plates operating during in harsh technological conditions with impact load, an aerodynamic sound hardening method has been developed that can increase a life of carbide tools up

---

### Адрес для переписки

Шелег Валерий Константинович  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Б. Хмельницкого, 9,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-74-54  
[metech@bntu.by](mailto:metech@bntu.by)

---

### Address for correspondence

Sheleg Valery K.  
Belarusian National Technical University  
9, B. Hmelnitzkogo str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-74-54  
[metech@bntu.by](mailto:metech@bntu.by)

to 3.7 times with a small added cost. The wear of plates hardened by the aerodynamic sound method, after 100 min of cutting, is 1.12–1.7 times less than their un-strengthened analogues. A coating on metal carbide plates does not have a prevailing value when a tool is working with impact loads. While working with impact loads viscosity of an internal plate structure occurs the greatest influence on increasing resistance. For metal-cutting carbide plates during interrupted cutting with significant impact loads, a method of aerodynamic sound hardening is more effective than a coating method, not only in terms of tool performance, but also in the cost of completion itself. Empirical dependences of wear on the rear surface of carbide plates hardened by a aerodynamic sound method and plates with PVD coatings have been obtained in the form of approximation by polynomials of the 5<sup>th</sup> and 2<sup>nd</sup> degrees, which are convenient to use in a production environment. It has been revealed the higher carbide plate strength in bending leads to less influence of the method of aerodynamic sound hardening on the increase in wear resistance. So, taking into account the fact that for BK8-base the ultimate bending strength is 1666 MPa, and for T5K10 it is 1421 MPa, wear reduction after hardening by the aerodynamic sound method for БП3115-plates with BK base is 11.5 %, while for БП3225 – plates with TK-base – 27.1 %.

**Keywords:** aerodynamic sound hardening, hard alloys, coatings, wear resistance

**For citation:** Sheleg V. K., Jigalov A. N., Bogdan D. D. (2020) Study on Effect of Aerodynamic Sound Hardening for Wear of Coated Carbide Metal Plates. *Science and Technique*. 19 (4), 271–279. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-4-271-279> (in Russian)

## Введение

Металлорежущий твердосплавный инструмент широко применяется в современном машиностроении для обработки различных поверхностей деталей машин. В Республике Беларусь такой инструмент не производится.

Твердосплавные инструменты, наряду со своей высокой твердостью, достаточно хрупкие, что снижает их эффективное использование при механической обработке в процессе прерывистого резания из-за пониженной ударной стойкости.

Для повышения стойкости металлорежущего твердосплавного инструмента при прерывистом резании применяется метод аэродинамического звукового упрочнения (АДУ) [1], позволяющий с небольшой добавленной стоимостью существенно увеличить ресурс инструмента (до 3,7 раза) за счет повышения предела прочности при изгибе до 2230 МПа и ударной вязкости до 90 КДж/м<sup>2</sup> при сохранении заданной высокой твердости (до 92 HRA). Эффект при использовании метода АДУ заключается в воздействии волн звуковой частоты, приведенных в резонансное состояние, на дислокационную структуру упрочняемых твердых сплавов [2]. В результате этого происходит измельчение карбидных фаз и их перераспределение, уменьшение дислокаций внутренней структуры, а за счет самоорганизации на уровне кристаллической решетки обеспечивается переход от беспорядочного движения флуктуаций и их хаотического состояния к новому по-

рядку, позволяющему улучшать параметры структуры для заданных условий эксплуатации [3].

Также разработана математическая модель образования энергии в твердых сплавах, отличающаяся учетом влияния приведенных в резонансное состояние акустических волн звуковой частоты и предварительного теплового нагрева от внешнего источника на генерируемую энергию в атомах кристаллических решеток. Модель позволяет устанавливать значения амплитудно-частотных параметров и температуры, при которых возникающая энергия создает условия для смещения атомов кристаллических решеток элементов твердых сплавов и дислокационных образований, возникших от дефектов, связанных с нарушениями периодичности положения атомов в кристаллической решетке, в пределах всей структуры упрочняемого материала [4]. С использованием основных положений теорий волновых процессов, квантовой физики, классической теплоемкости и термодинамики, дислокаций, самоорганизации и хаотизации, упругости и пластичности, реологии, а также с применением технологии функционально-ориентированного проектирования и имитационного реологического моделирования дано математическое описание механизма аэродинамического звукового упрочнения, связанного с накачкой энергий в твердое тело, со смещением атомов кристаллической решетки и дислокаций в свободное, а затем в самоорганизованное состояние [5]. Осуществлено экспериментальное определение амплитудно-час-

тотных характеристик при аэродинамическом звуковом упрочнении твердых сплавов [6]. Проведены исследования влияния метода аэродинамического звукового упрочнения на износ твердосплавного инструмента при фрезерной обработке материала из стали [7]. АДУ оказывает влияние на шероховатость обработанных поверхностей: в период нормального износа шероховатость сначала уменьшается, а затем увеличивается, причем с одинаковой и значительно меньшей, чем в период приработки, интенсивностью [8]. Проведенные исследования влияния на предел прочности при изгибе и твердость твердых сплавов показали, что при упрочнении методом АДУ пластин марок Т5К10, Т15К6, ВК6, ВК8 твердость практически не изменяется по сравнению с базовыми, а предел прочности при изгибе увеличивается на 19–23 % [9].

Одни из наиболее эффективных направлений, повышающих стойкость твердосплавного металлорежущего инструмента, – методы химического осаждения покрытий (ХОП) из парогазовой фазы (CVD – Chemical Vapor Deposition) и физического осаждения покрытий (ФОП, PVD – Physical Vapor Deposition) [2]. Методы ХОП получили широкое распространение для нанесения покрытий на основе карбидов, нитридов, карбонитридов титана, а также окисла алюминия на многогранные неперетачиваемые твердосплавные пластины. В основе методов ХОП лежат гетерогенные химические реакции в парогазовой среде, окружающей режущий инструмент, в результате которых образуются покрытия, конденсирующиеся на его поверхности. При получении на рабочих поверхностях режущего инструмента соединений тугоплавких металлов исходными продуктами служат газообразные галогениды, при взаимодействии которых с другими составляющими смесей ( $H_2$ ,  $NH_3$ ,  $CO_2$  и прочими) образуются и конденсируются необходимые покрытия. Покрытия из TiN, TiC, TiCN являются базовыми при производстве инструментов из твердых сплавов. Методами ХОП из газовой фазы можно получать одно-, двух- и даже трехслойные покрытия, состоящие последовательно из карбида титана, карбонитрида титана и нитрида титана. Методы ХОП реализуются

при температуре около 1000–1200 °С, что исключает их использование для нанесения покрытий на инструменты из быстрорежущих и углеродистых сталей с низкой температурой отпуска. При CVD – покрытия с толщиной до 20 мкм ( $Al_2O_3$ ). Покрытие на основе ХОП увеличивает износостойкость инструмента, а также обеспечивает диффузионный барьер между твердым сплавом и материалом детали, защищает основу пластины от окислирования при высоких температурах, что позволяет работать с большими скоростями резания (увеличенными на 25–80 %). Благодаря этому стойкость твердосплавных пластин с покрытием в среднем увеличивается от 1,3 до 8 раз в широкой области применения [10].

На основе методов ХОП разработаны технологии, применяемые известными фирмами-производителями твердосплавного инструмента. Нанесение покрытий методом ФОП происходит за счет ионно-плазменной обработки в вакууме при 400–500 °С путем переноса массы вещества из парогазовой фазы, содержащей пары металла. Процессы ФОП позволяют управлять свойствами покрытия также и по номенклатуре инструментальных подложек [2]. Их широко используют такие ведущие мировые производители твердосплавного инструмента, как Sandvik Coromant, Hertel, Kennametal Hertel, Walter и др.

В связи с тем, что метод АДУ является новым и недостаточно изученным, интерес вызывает проведение исследований его эффективности в сравнении с эффективностью известных методов нанесения покрытий.

### Основная часть

Выполняли исследования влияния метода АДУ на износостойкость твердосплавных пластин формы PNUA-110408 производства ОАО «Победит» с заводским покрытием CVD – ВП3115, ВП3225 и с PVD-покрытием, нанесенным в ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси» (пластины Т5К10ж, Т5К10ч), а также пластин ООО «Вириал» формы VH5912, имеющих PVD-покрытие. Рассматривалась эффективность пластин, упрочненных методом АДУ (ВП3115у, ВП3225у, Т5К10у), в сравнении с эф-

фективностью пластин без покрытий (Т5К10) и неупрочненных (ВП3115н, ВП3225н, Т5К10н). Выбор марок твердых сплавов для проведения исследований основывался на наибольшей применимости таких сплавов в металлообрабатывающей промышленности при обработке прерывистых поверхностей со значительными ударными и циклически изменяющимися нагрузками.

При исследованиях износа пятигранные твердосплавные пластины формы PNUA-110408 размещались в корпусе фрезы таким образом, что главный и вспомогательный углы в плане были соответственно равны  $\varphi = 64^\circ$ ,  $\varphi_1 = 8^\circ$ ,  $\gamma_3 = 10^\circ$ , передний угол заточки  $\gamma_3 = 10^\circ$ , задний угол заточки  $\alpha_3 = 10^\circ$ . Обработка производилась на карусельно-фрезерном специальном станке модели ГФ2211 торцовыми фрезами диаметрами  $d$ , равными 63 и 200 мм. Обработке подвергались заготовки из стали 45 размерами  $16 \times 140$  мм с твердостью НВ 178–198. Имитация ударных нагрузок осуществлялась путем установки в пакете нескольких (от одной до пяти) заготовок с размещением между ними прокладок размером более величины подачи на зуб. Применялись режимы резания: скорость резания  $v = 158,3$  м/мин, подача на зуб  $s_z = 0,21$  мм/зуб, глубина резания  $t = 1,0$  мм. Пластины ВП3115 имеют основу ВК, пластины ВП3225 – основу ТК.

Замеры износа производили по задней поверхности  $h_3$  пластин через определенное время резания на инструментальном стереоскопическом микроскопе Stemi 2000-С фирмы Carl Zeiss с точностью измерений до 0,001 мм. Зависимости износа от времени резания для исследуемых металлорежущих твердосплавных пластин приведены на рис. 1.

На рис. 2 зависимости износа по задней поверхности  $h_3$  от времени резания  $\tau$  для исследуемых сплавов представлены в виде линий тренда, аппроксимирующих экспериментальные кривые по полиному 5-й степени. В табл. 1 приведены формулы для исследуемых сплавов, описывающие кривые тренда, представленные на рис. 2, и величины достоверности их аппроксимации в виде коэффициента  $R^2$ , представляющего собой долю дисперсии переменной износа в дисперсии времени.

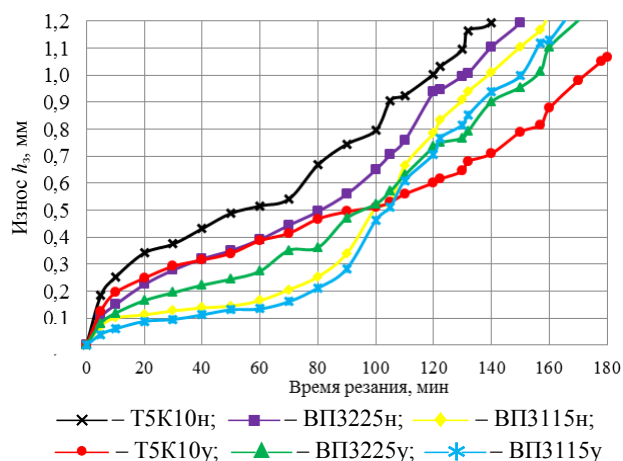


Рис. 1. Зависимости износа по задней поверхности  $h_3$  твердосплавных пластин с покрытием CVD и аэродинамическим звуковым упрочнением при фрезеровании стали 45 (x – произошел скол)

Fig. 1. Dependences of rear surface wear  $h_3$  for carbide inserts with CVD coating and aerodynamic sound hardening during milling of steel 45 (x – cleavage occurred)

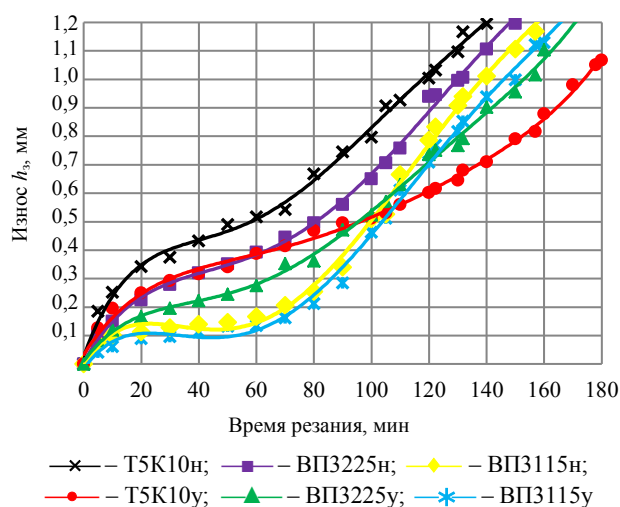


Рис. 2. Зависимости износа по задней поверхности  $h_3$  твердосплавных пластин с покрытием CVD и аэродинамическим звуковым упрочнением при фрезеровании стали 45 в виде полинома 5-й степени

Fig. 2. Dependences of rear surface wear  $h_3$  for carbide inserts with CVD coating and aerodynamic sound hardening during milling of steel 45 in the form of degree-five polynomial

Согласно табл. 1, экспериментальные результаты с высокой долей достоверности аппроксимации описаны принятыми линиями тренда. Величины погрешностей не превышают 2 %, о чем свидетельствуют коэффициенты  $R^2$ .

Таблица 1

Формулы для исследуемых сплавов, описывающие кривые тренда, представленные на рис. 2, и величины достоверности их аппроксимации в виде коэффициента  $R^2$

Formulas for the studied alloys describing trend curves presented in Fig. 2 and reliability values of their approximation in the form of coefficient  $R^2$

| Сплав   | Формула кривой тренда   | $R^2$  |
|---------|---|--------|
| T5K10н  | $h_3 = 0,0000000001\tau^5 - 0,00000007\tau^4 + 0,00001\tau^3 - 0,0008\tau^2 + 0,0278\tau + 0,029$     | 0,9895 |
| T5K10у  | $h_3 = 0,0000000004\tau^5 - 0,00000002\tau^4 + 0,000004\tau^3 - 0,0003\tau^2 + 0,0159\tau - 0,0337$   | 0,9966 |
| ВП3225н | $h_3 = 0,0000000004\tau^5 - 0,00000002\tau^4 + 0,000005\tau^3 + 0,000418\tau^2 + 0,018\tau + 0,00077$ | 0,9978 |
| ВП3225у | $h_3 = 0,0000000007\tau^5 - 0,00000003\tau^4 + 0,000005\tau^3 - 0,0004\tau^2 + 0,0136\tau + 0,01068$  | 0,9978 |
| ВП3115н | $h_3 = 0,0000000001\tau^5 - 0,00000006\tau^4 + 0,00001\tau^3 - 0,0006\tau^2 + 0,0167\tau + 0,0056$    | 0,9976 |
| ВП3115у | $h_3 = 0,0000000001\tau^5 - 0,00000005\tau^4 + 0,000009\tau^3 - 0,0006\tau^2 + 0,0144\tau - 0,0168$   | 0,9973 |

Анализ графических зависимостей (рис. 1) показывает, что износ пластин, упрочненных АДУ, после 100 мин резания меньше износа своих неупрочненных аналогов. Так, при 120 мин резания износ по задней поверхности  $h_3$  для базовых пластин T5K10н составляет 1,02 мм, в то время как для пластин T5K10у, упрочненных АДУ, – 0,60 мм, что в 1,7 раза меньше. Для неупрочненных пластин ВП3225н износ  $h_3 = 0,89$  мм, а для пластин, упрочненных АДУ, 0,70 мм, что в 1,27 раза меньше. Для неупрочненных пластин ВП3115н износ  $h_3$  составляет 0,78 мм, а для пластин ВП3115у – на 11,5 % меньше.

Представленные в табл. 1 зависимости, описываемые полиномом 5-й степени, являются громоздкими и неудобными для практического применения. Предлагается упростить экспериментальные зависимости и представить их в виде полинома 2-й степени. Результаты в гра-

фическом виде представлены на рис. 3, а в виде эмпирических зависимостей – в табл. 2.

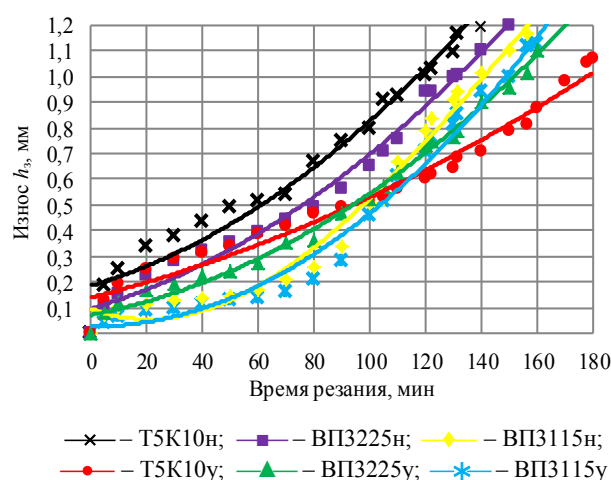


Рис. 3. Зависимости износа по задней поверхности  $h_3$  твердосплавных пластин с покрытием CVD и аэродинамическим звуковым упрочнением при фрезеровании стали 45, аппроксимированные полиномом 2-й степени (× – произошел скол)

Fig. 3. Dependences of rear surface wear  $h_3$  for carbide inserts with CVD coating and aerodynamic sound hardening during milling of steel 45, approximated by a polynomial of the 2<sup>nd</sup> degree (× – cleavage occurred)

Таблица 2

Формулы для исследуемых сплавов, описывающие кривые тренда, представленные на рис. 3, и величины достоверности их аппроксимации в виде коэффициента  $R^2$

Formulas for the studied alloys describing trend curves presented in Fig. 3 and reliability values of their approximation in the form of coefficient  $R^2$

| Сплав   | Формула кривой тренда                        | $R^2$  |
|---------|--|--------|
| T5K10н  | $h_3 = 0,00005\tau^2 + 0,0032\tau + 0,1863$  | 0,9739 |
| T5K10у  | $h_3 = 0,00005\tau^2 + 0,0027\tau + 0,1412$  | 0,9726 |
| ВП3225н | $h_3 = 0,00005\tau^2 + 0,0032\tau + 0,0971$  | 0,9889 |
| ВП3225у | $h_3 = 0,00005\tau^2 + 0,002\tau + 0,073$    | 0,9945 |
| ВП3115н | $h_3 = 0,00005\tau^2 - 0,0002\tau + 0,0533$  | 0,9845 |
| ВП3115у | $h_3 = 0,00004\tau^2 + 0,00003\tau + 0,0263$ | 0,9865 |

Результаты величин достоверности аппроксимации (табл. 2), характеризующиеся коэффициентом  $R^2$ , показывают, что погрешность описания зависимостей износа по задней поверхности для твердосплавных пластин от

времени резания в виде полинома 2-й степени составляет не более 3 %, что является достаточно высоким уровнем точности и достоверности.

Следует отметить, что чем выше у твердосплавных пластин предел прочности при изгибе, тем меньше влияние метода АДУ на улучшение свойств по стойкости. Так, с учетом того, что для основы ВК8 предел прочности при изгибе составляет 1666 МПа, а для основы Т5К10 – 1421 МПа, снижение износа после воздействия метода АДУ для пластин ВП3115 – 11,5 %, в то время, как для пластин ВП3225 – 27,1 %. Исходя из анализа зависимостей, представленных в табл. 1 и 2, износ неупрочненных пластин более зависим от времени резания, чем пластин, упрочненных методом АДУ, на что указывают эмпирические коэффициенты при времени резания  $\tau$  в первой степени, которые значительно больше. Так, коэффициент при времени резания  $\tau$  в первой степени для пластины Т5К10н равен 0,0278, а для Т5К10у – 0,0159, что на 74,8 % больше. Соответственно превышение таких коэффициентов для пластин ВП3225 составляет 38,5 %, для ВП3115 – 16,0 %.

В зоне устоявшегося резания (от 20 до 90–100 мин) лучшие показатели по стойкости пластин наблюдаются у сплавов ВП3115у и ВП3115н, средние значения износа у пластин ВП3225у, Т5К10у и ВП3225н, а наибольший износ у Т5К10. Такое поведение пластин ВП3115у и ВП3115н объясняется комбинированным действием свойств, заложенных в них. Так, покрытие CVD, являясь весьма твердым и износостойким, снижает адгезионный износ, а основа, состоящая из сплава ВК, достаточно хорошо держит ударные нагрузки. Для пластин ВП3225у, ВП3225н и Т5К10у, основу которых составляет сплав ТК, хуже воспринимающий ударные нагрузки по сравнению с ВК, износостойкость на среднем уровне обеспечивается в основном за счет преобладающего влияния покрытия для сплавов ВП3225у, ВП3225н или упрочнения методом АДУ – для Т5К10у. Неупрочненная пластина Т5К10 не имеет преимуществ по заданным свойствам по сравнению с другими пластинами, участвующими в данном опыте, поэтому и показывает наихудшие результаты.

Следует отметить, что время обработки, при котором начинается критический износ у пластин, кроме Т5К10, примерно одинаковое и соответствует времени резания, примерно равному 60–70 мин.

Если взять за критерий критического износа величину износа по задней поверхности  $h_z = 1,0$  мм, то наименьшую стойкость, равную 118 мин, обеспечивает пластина Т5К10н без покрытия и без упрочнения методом АДУ. Далее стойкости пластин ВП3225н, ВП3115н, ВП3115у, ВП3225у и Т5К10у повышаются в следующем порядке: 130, 140, 147, 154 и 175 мин соответственно. Исходя из этого можно сделать вывод, что покрытие на пластинах не обладает преобладающим значением при работе инструмента с ударными нагрузками. Для работы с ударными нагрузками наибольшее влияние на повышение стойкости оказывает вязкость внутренней структура пластины.

Таким образом, при процессах прерывистого резания со значительными ударными нагрузками твердосплавные пластины, упрочненные методом АДУ, показывают большую эффективность по сравнению с пластинами с износостойкими покрытиями, причем не только по стойкостным показателям их работы, но и по себестоимости самой доработки.

В промышленности постоянно появляются новые твердосплавные металлорежущие пластины, которые производитель характеризует как наиболее эффективные. Твердосплавные пластины марки VH5912 представляют собой твердый сплав с PVD-покрытием и рекомендуются для токарной и фрезерной обработки сталей групп обрабатываемости P20–P40. Пластины VH5912 обладают повышенной износостойкостью.

На рис. 4 представлены экспериментальные кривые износа по задней поверхности  $h_z$  от времени резания для режущих пластин Т5К10у, VH5912у, упрочненных методом АДУ, и неупрочненных Т5К10н, VH5912н, Т5К10жн, Т5К10чн в виде экспериментальных замеров износа и эмпирических кривых тренда, аппроксимированных в виде полинома 5-й степени. В табл. 3 приведены степенные зависимости, описывающие кривые тренда, изображенные



на рис. 4, а также величины достоверности их аппроксимации в виде коэффициента  $R^2$ .

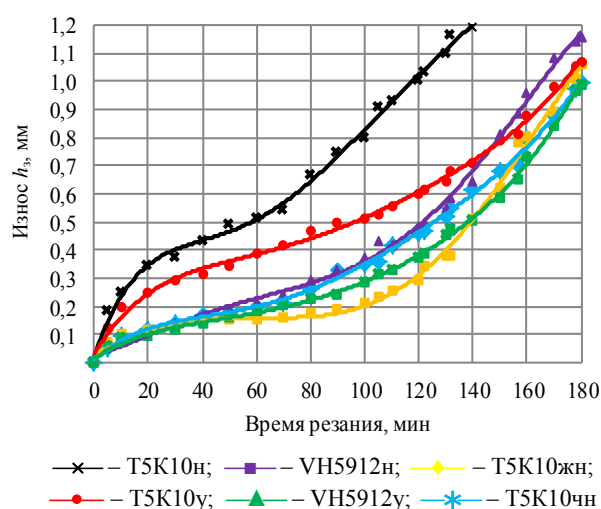


Рис. 4. Зависимости износа по задней поверхности  $h_3$  твердосплавных пластин с покрытием CVD ГНУ «ФТИ НАН Беларуси» и пластин ООО «Вириал» с аэродинамическим звуковым упрочнением при фрезеровании стали 45, аппроксимированные полиномом 5-й степени

Fig. 4. Dependences of rear surface wear  $h_3$  for carbide inserts with CVD coating made by State Scientific Institution "Physical-Technical Institute" of the National Academy of Sciences of Belarus and LLC "Virial" plates with aerodynamic sound hardening during milling of steel 45, approximated by a polynomial of degree 5

Как видно из табл. 3, экспериментальные результаты с высокой долей достоверности аппроксимируются линиями тренда в виде полинома 5-й степени; величины коэффициентов  $R^2$ , изменяющиеся в диапазоне 0,9895–0,9982, не превышают 2%-й достоверности.

Пластины VH5912y, упрочненные методом АДУ (рис. 4), имеют на всем протяжении кривой износ меньше износа неупрочненных аналогов VH5912H. Например, при 160 мин резания износ пластины VH5912y составляет 0,77 мм, а VH5912H – 0,94 мм, что меньше в 1,22 раза. Показатели по износу пластины VH5912y, упрочненной АДУ, также лучше, чем пластины T5K10y, упрочненной АДУ. Это происходит благодаря тому, что VH5912 имеет более низкую дисперсность структуры и более высокий предел прочности при изгибе, чем T5K10. Согласно табл. 4, износ неупрочненных пластин более зависит от времени резания, чем износ пластин, упрочненных методом АДУ.

Так, эмпирические коэффициенты при времени  $\tau$  с первой степенью, равные для пластин VH5912H и T5K10H соответственно 0,0278 и 0,0058, больше, чем данные характеристики упрочненных методом АДУ пластин: для VH5912y – 0,0159, для T5K10H – 0,0027.

Таблица 3

Формулы для исследуемых сплавов, описывающие кривые тренда, представленные на рис. 4, и величины достоверности их аппроксимации в виде коэффициента  $R^2$

Formulas for the studied alloys describing trend curves presented in Fig. 4 and reliability values of their approximation in the form of coefficient  $R^2$

| Сплав   | Формула кривой тренда  | $R^2$  |
|---------|--|--------|
| T5K10H  | $h_3 = 0,0000000001\tau^5 - 0,00000007\tau^4 + 0,00001\tau^3 - 0,0008\tau^2 + 0,0278\tau + 0,029$    | 0,9895 |
| T5K10y  | $h_3 = 0,0000000004\tau^5 - 0,00000002\tau^4 + 0,000004\tau^3 - 0,0003\tau^2 + 0,0159\tau - 0,0337$  | 0,9966 |
| VH5912H | $h_3 = 0,0000000004\tau^5 + 0,00000002\tau^4 - 0,000002\tau^3 + 0,0008\tau^2 + 0,0058\tau + 0,0262$  | 0,9968 |
| VH5912y | $h_3 = 0,0000000003\tau^5 - 0,00000002\tau^4 + 0,000003\tau^3 - 0,0002\tau^2 + 0,0027\tau - 0,0102$  | 0,9979 |
| T5K10ZH | $h_3 = 0,0000000004\tau^5 + 0,00000001\tau^4 + 0,000001\tau^3 - 0,00002\tau^2 + 0,0048\tau + 0,0304$ | 0,9958 |
| T5K10CH | $h_3 = 0,0000000002\tau^5 - 0,000000008\tau^4 + 0,000001\tau^3 - 0,0001\tau^2 + 0,0063\tau - 0,0163$ | 0,9982 |

Если произвести сравнение по износу пластин с покрытием, таких как VH5912y, T5K10ZH, T5K10CH, то, как видно из рис. 4, они ведут себя практически одинаково. Это можно объяснить тем, что PVD-покрытия, нанесенные в ГНУ «ФТИ НАН Беларуси» и ООО «Вириал», имеют практически одинаковый технологический уровень.

## ВЫВОДЫ

1. Получены эмпирические зависимости износа по задней поверхности твердосплавных металлорежущих пластин, упрочненных аэродинамическим звуковым методом, и пластин с PVD-покрытиями – в виде аппроксима-

ции полиномами 5-й и 2-й степеней, которыми удобно пользоваться в производственных условиях.

2. Достоверность аппроксимации экспериментальных и трендовых кривых составляет не менее 97 %, что указывает на высокую степень их точности и достоверности.

3. Установлено, что износ пластин, упрочненных аэродинамическим звуковым методом, после 100 мин резания меньше износа своих неупрочненных аналогов в 1,12–1,7 раза.

4. Выявлено, что чем выше у твердосплавных пластин предел прочности при изгибе, тем меньше влияние метода аэродинамического звукового упрочнения на повышение износостойкости. Так, с учетом того, что для основы ВК8 предел прочности при изгибе составляет 1666 МПа, а для основы Т5К10 – 1421 МПа, снижение износа после упрочнения аэродинамическим звуковым методом для пластин ВП3115 с основой ВК составляет 11,5 %, в то время как для ВП3225 с основой ТК – 27,1 %.

5. Следует отметить, что в зоне устоявшегося резания (от 20 до 90–100 мин) лучшие показатели по стойкости пластин наблюдаются у сплавов ВП3115у (основа ВК, покрытие PVD, упрочнение АДУ) и ВП3115н (основа ВК, покрытие PVD, без АДУ), средние значения износа – у пластин ВП3225у (основа ТК, покрытие PVD, упрочнение АДУ), Т5К10у (без покрытия, упрочнение АДУ) и ВП3225н (основа ТК, покрытие PVD, без АДУ), наименьшая стойкость – у Т5К10 без АДУ. Такое поведение пластин ВП3115у и ВП3115н объясняется комбинированным действием свойств, заложенных в них. Например, покрытие CVD, являясь весьма твердым и износостойким, снижает адгезионный износ, а основа, состоящая из сплава ВК, достаточно хорошо держит ударные нагрузки. Для пластин ВП3225у, ВП3225н и Т5К10у, основу которых составляет сплав ТК, хуже воспринимающий ударные нагрузки по сравнению с ВК, износостойкость на среднем уровне обеспечивается в основном за счет преобладающего влияния покрытия для сплавов ВП3225у, ВП3225н или упрочнения методом АДУ – для Т5К10у. Неупрочненная пластина Т5К10 не имеет преимуществ по заданным свойствам

по сравнению с другими пластинами, участвующими в данном опыте, поэтому и показывает наихудшие показатели.

6. Время обработки, при котором начинается критический износ у всех пластин, кроме Т5К10, примерно одинаковое (60–70 мин).

7. Покрытие на металлорежущих твердосплавных пластинах не носит преобладающего значения при работе инструмента с ударными нагрузками. Для работы с ударными нагрузками наибольшее влияние на повышение стойкости оказывает вязкость внутренней структуры пластины.

8. При процессах прерывистого резания со значительными ударными нагрузками твердосплавные пластины, упрочненные методом аэродинамического звукового упрочнения, показывают большую эффективность по сравнению с пластинами с износостойкими покрытиями, причем не только по стойкостным показателям их работы, но и по себестоимости самой доработки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Способ аэродинамического упрочнения изделий: пат. 21049 Респ. Беларусь; МПК C21D8/00 / А. Н. Жигалов, Г. Ф. Шатуров, В. М. Головкин; дата публ. 30.06.2017.
2. Жигалов, А. Н. Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег. Могилев: МГУП, 2019. 213 с.
3. Жигалов, А. Н. Прогрессивные технологии для процессов резания с ударами / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег // Прогресивні технології машинобудування: матеріали VII Міжнар. наук.-техн. конф. Львів–Карпати, 5–10 лют. 2018 р. С. 47–49.
4. Шелег, В. К. Инновации при создании метода аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента / В. К. Шелег, А. Н. Жигалов // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Брест, 27–28 мая 2019 г. / Брест: Изд-во БрГТУ, 2019. С. 51–54.
5. Жигалов, А. Н. Алгоритм энергообмена при температурно-волновом воздействии метода аэродинамического звукового упрочнения / А. Н. Жигалов // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы пятой Междунар. науч.-практ. конф., 16–17 мая 2019 г., Минск, М-во образования Респ. Беларусь, НИУ «Ин-т прикладной физ. проблем им. А. Н. Севченко» Белорус. гос. ун-та. Минск, 2019. С. 178–180.



6. Шелег, В. К. Экспериментальное определение амплитудно-частотных характеристик при аэродинамическом звуковом упрочнении твердых сплавов / В. К. Шелег, А. Н. Жигалов // Наука и техника. 2019. Т. 18, № 1. С. 11–20. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-1-11-20>.
  7. Шелег, В. К. Исследование влияния метода аэродинамического звукового упрочнения на износ твердосплавного инструмента при фрезерной обработке материала из стали / В. К. Шелег, А. Н. Жигалов // Горная механика и машиностроение. 2019. № 3. С. 56–65.
  8. Жигалов, А. Н. Влияние износа твердых сплавов, упрочненных аэродинамическим воздействием, на шероховатость обработанной поверхности при фрезерно-карусельном резании / А. Н. Жигалов // Вестник Белорусско-Российского университета. 2017. Т. 56, № 3. С. 5–15.
  9. Жигалов, А. Н. Влияние аэродинамического звукового упрочнения на предел прочности при изгибе и твердость твердых сплавов / А. Н. Жигалов, А. А. Жолобов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., 26–27 апр. 2018 г., Белор.-Рос. ун-т. Могилев: Белор.-Рос. ун-т., 2018. С. 131–132.
  10. Табаков, В. П. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями в условиях стесненного резания / В. П. Табаков, Д. И. Сагитов. Ульяновск: УлГТУ, 2015. 179 с.
- Поступила 12.03.2020  
Подписана в печать 19.05.2020  
Опубликована онлайн 30.07.2020
- ### REFERENCES
1. Jigalov A. N., Shaturov G. F., Golovkov V. M. (2017) *Method of Aerodynamic Hardening of Products: Patent No 21049 Republic of Belarus* (in Russian).
  2. Jigalov A. N., Sheleg V. K. (2019) *Theoretical Foundations of Aerodynamic Sound Hardening of Carbide Tools for Intermittent Cutting*. Mogilev, Mogilev State University of Food Technologies. 213 (in Russian).
  3. Jigalov A. N., Sheleg V. K. (2018) Advanced Technology for Impact Cutting. *Progresivni Tekhnologii Mashinobuduvanni: Materialy VII Mizhnar. Nauk.-Tekhn. Konf., L'viv-Karpaty, 5–10 Lyutogo 2018 r.* [Advanced Technologies in Mechanical Engineering: Proceedings of VII International Scientific and Technical Conference, Lviv-Karpaty, Febr. 5–10, 2018], 47–49 (in Russian).
  4. Sheleg V. K., Jigalov A. N. (2019) Innovations in Creating the Method of Aerodynamic Sound Hardening of Carbide Tools. *Novye Tekhnologii i Materialy, Avtomatizatsiya Proizvodstva: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Brest, 27–28 Maya 2019 g.* [New Technologies and Materials, Automation of Production Process: Proceedings of International Scientific and Technical Conference, Brest, May 27–28, 2019]. Brest, Brest State Technical University, 51–54 (in Russian).
  5. Jigalov A. N. (2019) Energy Exchange Algorithm for Temperature-Wave Exposure by the Method of Aerodynamic Soundhardening. *Prikladnye Problemy Optiki, Informatiki, Radiofiziki i Fiziki Kondensirovannogo Sostoyaniya: Materialy Pyatoi Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., 16–17 Maya 2019 g.* [Applied Problems of Optics, Informatics, Radio-physics and Physics of Condensed State: Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Scientific and Technical Conference, May 16–17, 2019]. Minsk, 178–180 (in Russian).
  6. Sheleg V. K., Jigalov A. N. (2019) Experimental Determination of Amplitude-Frequency Characteristics in Response to Sound Strengthening of Hard Alloys. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 18 (1), 11–20 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-1-11-20>.
  7. Sheleg V. K., Jigalov A. N. (2019) Investigation of the Influence of Method for Aerodynamic Sound Hardening on Wear of Carbide Tools During Milling of Steel Material. *Gornaya Mekhanika i Mashinostroyeniye = Mining Mechanical Engineering and Machine-Building*, (3), 56–65 (in Russian).
  8. Jigalov A. N. (2017) Effect of Wear of Hard Alloys Hardened by Aerodynamic Method on the Surface Roughness During Milling and Rotary Cutting. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo Universiteta* [Bulletin of Belarusian-Russian University], 56 (3), 5–15 (in Russian).
  9. Jigalov A. N., Zholobov A. A. (2018) Effect of Aerodynamic Sound Hardening on Flexural Strength and Hardness of Hard Alloys. *Materialy, Oborudovanie i Resursosberegayushchie Tekhnologii: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., 26–27 Apr. 2018 g.* [Materials, Equipment and Resource-Saving Technologies: Proceedings of International Scientific and Technical Conference, April 26–27, 2018]. Mogilev, Belarusian-Russian University, 131–132 (in Russian).
  10. Tabakov V. P., Sagitov D. I. (2015) *Performance of Cutting Tools with Wear-Resistant Coatings in Tight Cutting Conditions*. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University. 179 (in Russian).
- Received: 12.03.2020  
Accepted: 19.05.2020  
Published online: 30.07.2020